

## Développement d'une Méthodologie pour Déterminer et Cartographie du Rayonnement Thermique du Sol

Nour el islam Bacahari<sup>1</sup>, Abdelhak Razagui<sup>2</sup>

<sup>1</sup>.Faculté des Sciences Biologiques U.S.T.H.B., 2. O.N.M Dar elbeida Alger, bachari10@yahoo.fr

**Résumé** - L'estimation du rayonnement thermique nécessite la mesure ou le calcul des différents paramètres tels que, l'albédo de surface, l'émissivité du sol et les différentes températures d'air et du sol. Un modèle physique est développé pour déterminer l'albédo de surface et le au sol à partir des images météo-sat. Pour déterminer la température du sol nous avons utilisés une banque des données des différentes températures mesurées par 34 stations climatiques réparties sur le sol algérien. Les différentes températures d'air (maximale, minimale, horaire) sont mises dans un modèle linéaire afin de calculer la température de surface.. Nous avons corrélées les NDVI et les albédos de surface, une forme parabolique reliant les deux paramètres est établie. Les NDVI sont reliées à l'émissivité de surface par une relation paramétrique linéaire. Une étude qualitative est effectuée afin d'établir des cartes du rayonnement thermiques journalières, décadaires et mensuelles.

**Abstract** - The evaluation of the thermal radiance requires the measure or the estimation of the different parameters such as, the surface albedo, the ground emissivity and the different temperatures of the air and ground. A physical model is developed to determine the albedo of the surface from pictures Meteosat. To determine the temperature of the ground we used a data bank of different temperatures measured by 50 climatic stations distributed over the Algerian territory. The different temperatures of the air (maximal, minimal, hourly) are used in a linear model in order to estimate the temperature of the surface. We have correlated the NDVI and albedo of the surface, a parabolic shape joining the two parameters is established. The NDVIS are related to the emissivity of the surface by a linear parametric relation. A qualitative study is carried in order to establish different maps of the radiance thermal daily, decade and monthly.

**Mots clés** : Images satellites, albédo de surface, Indices de végétation, émissivité, Températures de surface, cartes du rayonnement thermique

### 1. INTRODUCTION

L'Algérie est un vaste pays, qui se trouve au Nord de l'Afrique et à la rive sud de la Méditerranée. Une sécheresse longue touche le pays ce qui a facilité l'avancement du désert dans tout les sens. Plusieurs régions du Nord sont ensablé d'autres régions était fertile dans ces dernières années sont complètement arides ou semi-arides. La désertification est un phénomène naturel accentué par l'activité humaine est devenu un problème à risque majeur qui touche le pays. Développer une politique de combat de ce phénomène nécessite une connaissance préalable des différents acteurs et parmi ces facteurs la connaissance des échanges énergétiques à l'interface sol-atmosphère. Connaître les différents éléments intervenant dans l'équation du bilan d'énergie nécessite des mesures et développement des modèles spécifiques. La partie radiative représente la partie principale de l'équation du bilan d'énergie. La partie radiative du point de vu spectrale est présenté par le bilan radiative dans la bande du visible qui a fait l'objet de plusieurs études [1,2,3] par contre peu d'études sont intéressées par la partie du bilan thermique. Pour connaître le bilan thermique au sol il faut connaître à la fois la température de surface, la température d'air et l'émissivité du sol [4]. Certains auteurs proposent des solutions analytiques ou numériques en se basant sur les mesures météorologiques qui sont utilisées pour une étude locale mais peu des solutions sont proposés pour une cartographie du rayonnement thermique. Dans ce travail nous proposons une méthodologie qui combine entre les mesures acquises au sol et les images satellites afin de résoudre ce problème. Toute la difficulté est la mise en échelle des différentes mesures et pour faire nous proposons un échantillonnage spatiale en utilisant la technique de Krigeage.

### 2. DONNEES

Dans notre travail nous avons utilisées des données météorologiques mesurées au sol par les stations implantées au sol et des images satellites.

#### 2.1 Données météorologiques

Les données météorologiques acquises par les différentes stations réparties au sol, restent le moyen le plus fiable et le plus utilisé pour la quantification de ces flux. La température à deux mètres est relevée d'une manière régulière (chaque heure). La température de surface (Température au sol) est relevée deux fois par jour, l'une à 18h00 le soir (le maximum), et l'autre à 0600 du matin (le minimum). Ces valeurs de températures représentent

les extrêmes de la journée. Le fichier de base est le fichier ASCII comportant 50 stations, réparties sur l'ensemble du territoire Algérien. Ce fichier comporte essentiellement dans la première colonne le code d'identification de la station et dans les colonnes (2 et 3), les coordonnées géographiques (latitude, longitude) de chaque station, suivi de leurs températures trihoraires journalières (à deux mètres, et au sol). Pour générer une structure raster des températures à partir des données aux stations réparties irrégulièrement, on utilise la méthode d'interpolation du Krigeage par le Logiciel WINSURF.

## 2.2 Données Images

Deux stations de réception des images satellites sont implémentées en Algérie, une est utilisée pour la réception et l'archivage des images météosat et l'autre est utilisé pour l'acquisition et l'archivage des images NOAA. Les images météosat utilisées dans notre travail représentent une banque d'images pour toute l'année 2002 de format PDUS et pour les deux bandes spectrales visible et infrarouge. Les images du satellite NOAA sont prises dans les cinq canaux et présentent la partie nord algérien.

## 2.3 Zone du travail

Vu la faible densité du réseau de stations au sud de l'Algérie, nous avons sélectionnés un domaine de travail où le réseau de stations est assez dense (Fig.1). Cette zone est présentée par un cadre projeté sur une image météosat

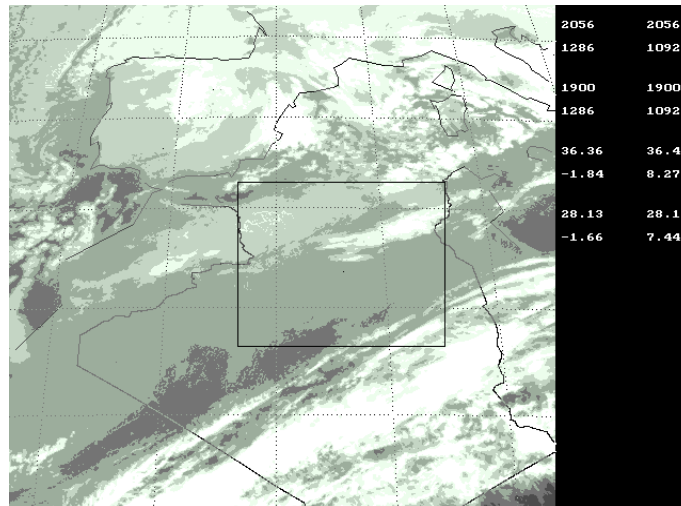


Fig.1 Zone du travail cadré sur une image météosat

## 3. Modélisation

Le rayonnement net au sol est la combinaison de trois composantes qui sont, le rayonnement absorbé par le sol dans le domaine des courtes longueurs d'ondes (bilan d'énergie dans le visible), et du rayonnement tellurique, émis par le sol et l'atmosphère dans le domaine des grandes longueurs d'ondes (bilan d'énergie dans l'infrarouge). Sa formulation est donnée par la relation suivante.

$$R_n = (1 - \alpha)G_n + R_a - R_s \quad [W/m^2] \quad (1)$$

$\alpha$  est albédo de surface,  $G_n$  est le rayonnement global au sol par ciel semi couvert,  $(1 - \alpha)G_n$  représente le rayonnement absorbé par le sol dans le visible,  $R_a$  est le rayonnement émis par l'atmosphère dans (IR) et  $R_s$  est le rayonnement émis par la surface dans (IR).

## 3.1 Flux thermique

### 3.2.1. Flux émis par l'atmosphère

Dans notre travail on s'est inspiré des travaux antérieurs, pour calculer le flux atmosphérique reçu par le sol dans le domaine des grandes longueurs d'ondes. Citons la formule donnée par Holtstag et Van Ulden [5].

$$R_a = 5.3110^{-13} T_a^6 + 60 N - 20 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2)$$

$T_a$  est Température de l'air à deux mètres du sol en [°K] et N l'ennuagement.

### 3.2.2. Flux émis par la terre

Le sol est un ensemble d'objets, de natures différentes (végétation, eau, sable etc..) maintenus à différentes températures, dont le flux émis par un objet est donné par la relation suivante :

$$R_l = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (3)$$

$T_s$  est la température de surface de l'objet en [°K],  $\epsilon$  représente le pouvoir d'émission d'un objet (émissivité) et  $\sigma$  est la constante de Boltzmann (  $5.665 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$  )

## 4. DETERMINATION DES DIFFERENTS PARAMETRES

### 4.1 Température au sol $T_s$

La détermination de la température au sol, est une tâche complexe vu que cette dernière n'est mesurée que deux fois par jour. Le flux IR émis par le sol, doit être déterminé comme étant le cumul journalier. Son calcul nécessite donc une intégration des valeurs horaires. Pour calculer les températures horaires, nous allons utiliser une interpolation temporelle de la température au sol, par la méthode dite de relaxation développée par Pratt (1980), et repris par Abdellaoui [6], dont l'essentiel du contenu est :

$$T_a - \bar{T}_a = a(T_s - \bar{T}_s) + b \quad (4)$$

$$a = \frac{T_{a \max} - T_{a \min}}{T_{s \max} - T_{s \min}} ; \quad b = (T_{a \max} - \bar{T}_a) - a(T_{s \max} - \bar{T}_s)$$

Avec  $T_{a \max}$  et  $T_{a \min}$  sont les températures maximale et minimale sous abri ( à deux mètres du sol).  $T_{s \max}$  et  $T_{s \min}$  sont les températures, maximale et minimale au sol.  $\bar{T}_a$  est la température moyenne journalière à deux mètres,  $\bar{T}_s$  est la température moyenne journalière au sol, Ce qui donne pour la température horaire, la relation suivante:

$$T_s = \bar{T}_s + \frac{1}{a} \left[ (T_a - \bar{T}_a) - b \right] \quad (5)$$

### 4.2 Calcul de l'émissivité

L'émissivité est une propriété radiative des objets. C'est une grandeur spectrale et angulaire. Cartographie l'émissivité nécessite des mesures réelles qui sont effectuées par des satellites. Le satellite NOAA AVHR observe la terre à la fois dans deux bandes spectrales visibles et dans deux bandes spectrale infrarouge. En utilisant les deux bandes spectrales visible on peut déterminer l'indice du couvert végétal (NDVI). Van de Griend et al [7], propose une relation linéaire reliant l'émissivité à NDVI :

$$\epsilon = 1.0094 + 0.047 \text{Ln}(\text{NDVI}) \quad (6)$$

Notre objectif est de trouver une relation statistique qui lie l'émissivité non pas à l'indice de végétation d'un pixel donné mais à son albédo émissivité.

#### 4.2.1 Extraction d'albédo de surface

L'équation de transfert radiatif en haute atmosphère à ciel clair pour un sol homogène d'albédo  $\alpha_s$  est donnée par l'équation suivante :

$$E = E^o + \frac{G_{skc} T(\theta_v)}{1 - s \alpha_s} \quad (7)$$

$E^o$  désigne la radiation diffuse vers l'extérieur ( $W\text{ cm}^{-2}$ ) par les particules suspendues dans l'atmosphère et qui peut être captée par le satellite et qu'on appelle aussi bruit;  $G_{skc}$  représente la radiation globale qui atteint le sol par ciel clair ( $W\text{ cm}^{-2}$ );  $T(\theta_v)$  est la transmittance totale de la radiation directe dans la direction pixel-satellite (sans dimension);  $\theta_v$  angle de vue du capteur et  $s$  est l'albédo sphérique représentant la diffusion de la radiation réfléchie par l'atmosphère vers le sol et le terme  $(1-s.\alpha_s)^{-1}$  décrit la réflexion multiple sol atmosphère.

Dans le cas d'une surface d'albédo moyen, le terme de réflexion multiple  $(1-s.\alpha_s)^{-1}$  est développé en premier ordre  $(1-s.\alpha_s)^{-1} \approx (1+s.\alpha_s)$  et l'équation (2) prend une forme parabolique :

$$E = E^o + G_{skc} T(\theta_v) \alpha_s + G_{skc} s T(\theta_v) \alpha_s^2 \quad (8)$$

Le radiomètre capte l'énergie  $E$  et la transforme en compte numérique dit brillance  $B(x,y)$ . Si nous considérons que la diffusion est Lambertienne la relation entre  $E$  et la brillance  $B$  est [1] :

$$E(\text{lat}, \text{lon}, j, h) = \pi C B(\text{line}, \text{pixel}, j, h) \sin(\gamma) \quad (9)$$

$C$  : coefficient de calibration du capteur de météosat.

La solution retenue de l'équation (8) est donnée par la relation suivante :

$$\alpha_{s2} = \frac{(-G_{skc} T(\theta_v) + ((G_{skc} T(\theta_v))^2 + 4(E - E^o) G_{skc} s T(\theta_v))^{0.5})}{2G_{skc} s T(\theta_v)} \quad (10)$$

#### 4.2.2. Régression entre l'émissivité et l'albédo

Ainsi, après avoir sélectionné un nombre important de pixels ayant des valeurs d'émissivités s'étalant sur une plage de 0.5 jusqu'à 0.9, corrélées avec les valeurs d'albédo de surface pour les mêmes pixels, on obtient un coefficient de corrélation de l'ordre de 0.9. Le polynôme d'ordre trois qui ajuste le mieux ces deux séries est donné par la relation suivante :

$$\varepsilon = 0.874 - 0.232 \alpha + 0.0137 \alpha^2 \quad (11)$$

$\varepsilon$  est l'émissivité du pixel et  $\alpha$  est l'albédo du même pixel dans le canal visible du radiomètre AVHRR (NOAA) et qui sera extrapolée dans le cas de météosat.

#### 4.3 Calcul de l'ennuagement N

Pour quantifier le taux de couverture nuageuse d'un pixel donné, nous procédons de deux manières suivant l'état du ciel et la température du sommet de nuage. Pour une situation durant laquelle le pixel est couvert au moins une fois pendant le mois et dont la température du sommet de nuage est inférieure à zéro degré °C, on utilise le canal infrarouge et par la technique de la brillance minimale et la brillance maximale sur tout le mois, on calcule l'ennuagement par la formulation suivante :

$$N(j, h) = \frac{CN_{max} - CN(j, h)}{CN_{max} - CN_{min}} \quad (12)$$

avec  $CN_{max}$  : est la valeur numérique maximale enregistrée pendant tout le mois pour un pixel donné,  $CN_{min}$  : est la valeur numérique minimale enregistrée pendant tout le mois pour le même pixel,  $CN(j, h)$  : est la valeur numérique enregistrée pendant le jour  $j$  à l'heure  $h$  pour.

Afin d'ajuster le calcul d'ennuagement nous proposons une nouvelle formule qui utilise à la fois le contraste entre les radiances, l'albédo de nuage et l'albédo du sol.

$$N^* = \left(1 - \frac{\alpha_s}{\alpha_n}\right) N \quad (13)$$

où:  $\alpha_s$  est l'albédo du sol  $\alpha_n$  est l'albédo du nuage

Cet ajustement est nécessaire car l'évaluation de la performance de tout modèle de mesure du rayonnement qui atteint le sol dépendra largement des valeurs d'ennuagement.

## 5. CARTOGRAPHIE ET DISCUSSION

Cartographie des paramètres spécifiques aux objets est une opération qui nécessite une interpolation spatiale. Dans notre travail la méthode suivie est de rendre les images météosat géoreférencées. A chaque pixel on lui fait correspondre ses paramètres et par une procédure de vectorisation on transforme les images en format vectoriel. Le logiciel SURFER est un logiciel professionnel en cartographie qui est utilisé dans la suite du travail

### 5.1 Rayonnement émis par l'atmosphère

Le rayonnement grandes longueurs d'ondes (IR) émis par l'atmosphère est intégré sur toute le journée par interpolation linéaire entre chaque heure . Les faibles valeurs sont observées au Sud, alors que les fortes valeurs, sont enregistrées au Nord. Le noyau des valeurs minimales est enregistré à l'Est de Beni-abbes, sur l'extrême sud d'El-bayad (régions steppiées) où nous avons relevé, les plus basses températures pendant cette journée (Fig.2). Le noyau des valeurs maximales est enregistré sur la région d'El-oued (région désertique). Consultons, les images d'ennuageement (09h00, 12h00, 15h00), on observe bien une masse nuageuse importante couvrant toute cette régions. Notons que l'existence d'une telle couverture nuageuse contribue d'une façon significative au flux émis par l'atmosphère.

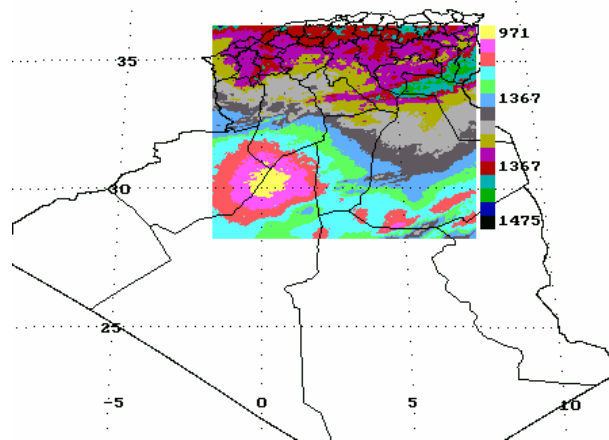


Fig.2 : Cumul journalier de rayonnement

### 5.2 Rayonnement émis par le sol

La carte représentant l'énergie émise par le sol, est réalisé en deux étapes. Nous avons en premier lieu calculer l'émissivité propre à chaque type de sol, ensuite appliquer un modèle d'interpolation temporel pour rattraper les températures horaires au niveau du sol à partir des températures extrêmes au sol et sous abri, des températures moyennes au sol et sous abri et des températures horaires sous abri. La carte d'émissivité retrace d'une autre façon, les caractéristiques physiques des différentes surfaces du sol (Fig.3).

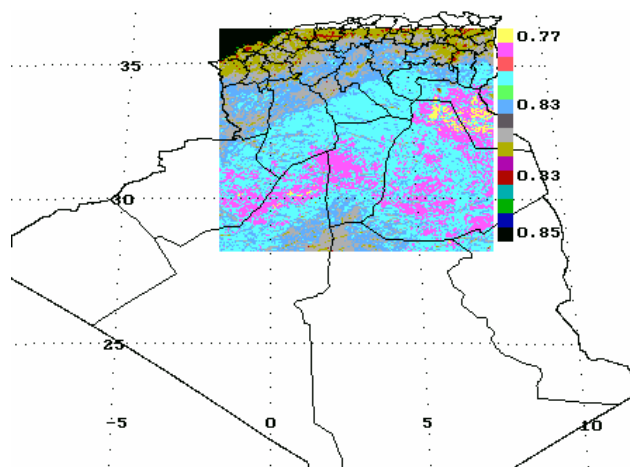


Fig.3 : Emissivité de surface

Les fortes valeurs d'albédo correspondent à des faibles valeurs d'émissivités et inversement (Fig.4). Les valeurs maximales enregistrées, sont de l'ordre de 0.95 observées sur la mer méditerranée près des côtes où la

mer est peu profonde. Le minimum d'émissivité est observé sur les régions désertiques (sableuses) avec un noyau des valeurs minimales enregistré sur la région d'El-oued, Ouargla, et Hassi-messaoud. Au Nord, sur les chaînes de montagne de l'Ouest on note une émissivité relativement forte, témoignant de la faible reflectance, et de la forte activité de la photosynthèse des plantes (fôret de l'Ouest). Les valeurs du même ordre, sont observées sur les régions arides du Centre et de l'Est.

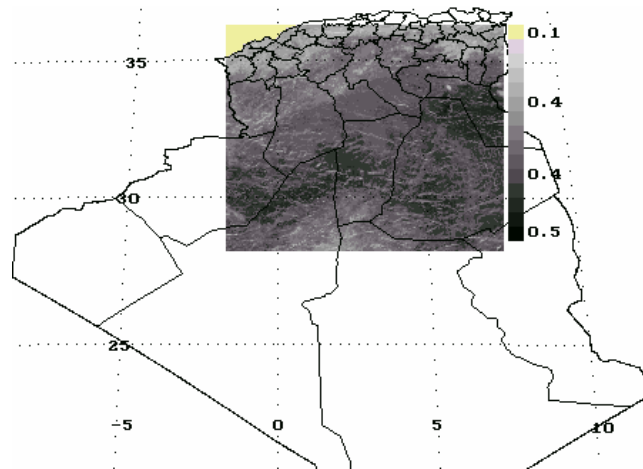


Fig.4 : Albédo de surface

### 5.3 Rayonnement thermique

Après avoir interpolé toutes les températures horaires (Fig.5), nous pouvons par suite calculer le cumul de rayonnement journalier émis par le sol par intégration du lever au coucher de soleil.

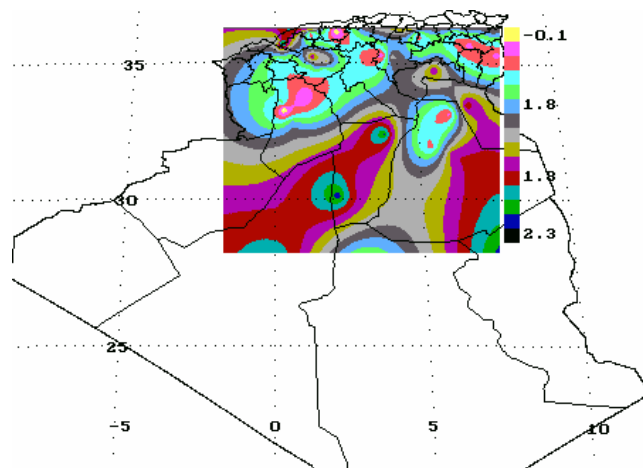


Fig.5 : Température au sol

La combinaison algébrique entre les différentes cartes nous permet d'obtenir la carte du rayonnement thermique. L'analyse de la carte du rayonnement thermique (Fig.6), montre nettement que le noyau des valeurs minimales, qui est de l'ordre de  $1132 \text{ J/cm}^2$ , est observé plus au Nord (El-bayad, Mechria et Ain-safra) comparativement au noyau enregistré sur la carte d'énergie émise par l'atmosphère qui se trouve lui par contre plus au Sud de ces régions. Ces valeurs d'énergie minimales correspondent aux plus basses températures au sol enregistrées sur des régions à hautes altitudes (1341, 1149 et 1058m). Les valeurs maximales sont enregistrées sur les régions steppiées de basses altitudes du nord et les régions désertiques, avec un noyau de fortes valeurs qui est de l'ordre de  $1430 \text{ J/cm}^2$  centré sur la région de Ain Sallah.

### 5.4 Validité du modèle d'interpolation

Pour tester la validité du modèle de relaxation utilisé pour l'interpolation des températures horaires au sol, nous avons comparé, les températures enregistrées par la nouvelle station automatique récemment installée à la station d'Oran, avec les températures calculées par le modèle pour la journée du 20 juin 2002.

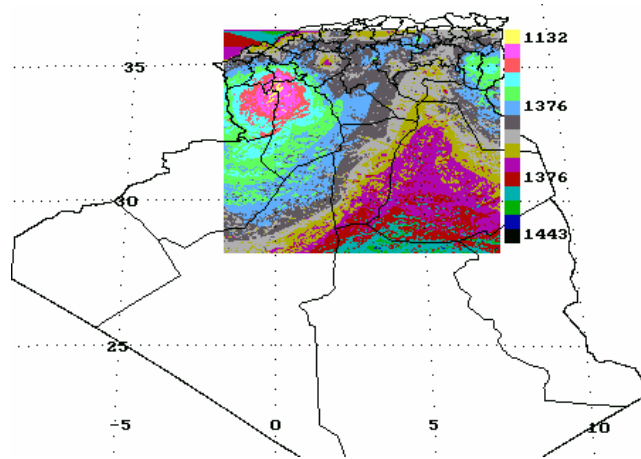


Fig. 6 : Cumul du rayonnement thermique

L'analyse statistique montre que le coefficient de corrélation positif (0.97) et l'erreur type sur les valeurs calculées est de 0.886°C pour une moyenne mesurée de l'ordre de 25.10°C.

## 6. CONCLUSION

Déterminer le flux tellurique passe par la connaissance de température de surface et d'air et émissivité. Utiliser les mesures in situ seulement pose un problème d'interpolation spatiale, utiliser la télédétection pose un problème technique vu que la mesure en elle-même engendre deux inconnus. Devant ce problème nous avons proposé un ensemble des solutions en combinant à la fois les mesures météorologiques de chaque jour et les images satellites prises par des différents capteurs tels que météosat et NOAA AVHRR. La méthode de relaxation est testée sur terrain et on a montré qu'elle permet d'obtenir la température du sol à partir des températures mesurées sous abri. Aussi dans notre travail nous avons proposé une technique permettant l'extraction d'émissivité à partir des images NDVI. Le paramètre clé dans la modélisation est le taux de couverture nuageuse. Nous avons utilisé les images météosat et nous avons développé une nouvelle relation corrigeant une relation classique. D'une manière implicite nous avons attribués à chaque pixel albédo de surface son émissivité à l'échelle d'image météosat. Une vectorisation des images des images météosat est effectuée. Nous avons utilisé le logiciel WINSURF pour effectuer une interpolation spatiale à la même échelle des différents paramètres. En utilisant des combinaisons algébriques entre les cartes précédentes nous calculons pour chaque pixel son rayonnement thermique. Les cartes du rayonnement thermiques sont analysées et comparées.

## NOMENCLATURE

- $R_n$  : rayonnement net [ $J \cdot cm^{-2}$ ]
- $a$  est albédo de surface
- $G_n$  : rayonnement global au sol par ciel semi couvert [ $J \cdot cm^{-2}$ ]
- $R_a$  : rayonnement émis par l'atmosphère [ $J \cdot cm^{-2}$ ]
- $R_s$  : rayonnement émis par la surface [ $J \cdot cm^{-2}$ ]
- $T_a$  : Température de l'air à deux mètres du sol en [°K]
- N : l'enneigement.
- $T_{a\max}$  : Température maximale sous abri [°K]
- $T_{a\min}$  : Température minimale sous abri [°K]
- $T_{s\max}$  : Température maximale [°K]
- $T_{s\min}$  : Température minimale au sol [°K].
- $\overline{T_a}$  : Température moyenne journalière à deux mètres [°K]
- $\overline{T_s}$  : Température moyenne journalière au sol [°K]
- NDVI : Indice du couvert végétal
- $\epsilon$  : émissivité

$E^\circ$  : Radiation diffuse vers l'extérieur ( $W\ cm^{-2}$ )  
 $G_{s_{kc}}$  : Radiation globale qui atteint le sol par ciel clair ( $W\ cm^{-2}$ );  
 $T(\theta_v)$  : Transmittance totale de la radiation directe  
 $\theta_v$  : Angle de vue du capteur  
 $s$  : albédo sphérique  
 $CN_{max}$  : Compte numérique maximale enregistrée pendant tout le mois pour un pixel donné,  
 $CN_{min}$  : est la valeur numérique minimale enregistrée pendant tout le mois  
 $CN(j,h)$  : est la valeur numérique enregistrée pendant le jour j à l'heure h pour  
 $N^*$  : ennuagement corrigé  
 $\alpha_s$  : albédo du sol  
 $\alpha_n$  : albédo du nuage  
 $E$  : Energie captée par radiomètre embarquée par le satellite  
 $B(x,y)$  : compte numérique  
 $\gamma$  : angle de position d'un lieu donné observé par le capteur  
 $C$  : coefficient de calibration du capteur de météoat.

## REFERENCES

- [1] Bachari .N. Benabadji.N. Razagui.A. and Belbachir.A.H. "Estimation et cartographie des différentes composantes du rayonnement solaire au sol à partir des images meteosat",Revue des Energies Rounevelables `` ,Vol.4, N°1 ,pp35-49 (2001)
- [2] N. Bachari., "Methodologie d'analyse des données satellitaires en utilisant des données multi-sources",D.Etat `` ,Université des sciences et technologie d'Oran, (1999)
- [3] Ceballos.J.C. and Moura.G.B.A. "Solar irradiation from geostationary satellite data-ii.Physcals models",Solar Energy``,Vol.60, pp 209-219 (1997)
- [4] Shumegge.T. French.A.and Kustas.w. "Estimating surfaces fluxes over the SGP site with remotley sensed data", In proceedings of IGARSS . Germany (1999)
- [5] Holtstag.A.A. and Van Ulden. "Estimates of incoming schortwave radiation and net radiation from standard meteorological data" KNMI Scientific report W.R.80-6 (1980)
- [6] A. Abdellaoui. "Détermination des variables spatio-temporelles du bilan énergétique au sol Par télédétection visible et infrarouge",D.Etat `` ,Université de Strasbourg, (1986)
- [7] V.M. Griend, A.A. Owe, H.F. Vugts, G.K. Ramothwa and S.W.M. Peters, "Bostswanawater ans surface energy balance research program". Part 1 : Integrated approach and field campaign results, BCRS report no 91-38a. 1992